第38卷 第3期
2021年5月

干 旱 区 研 究
ARID ZONE RESEARCH

Vol. 38 No. 3
May 2021

大同土林地貌沉积物粒度特征分析

蔡莹莹， 李继彦， 屈 欣， 王 萌， 王颖颖

（太原师范学院地理科学学院，山西 晋中 030619）

摘 要：土林是在干旱-半干旱地区典型的流水侵蚀地貌，研究其物质组成可揭示土林沉积环境演变过程，为进一步探究土林的发育演化奠定基础。本文采用粒度分析方法，对其地层剖面沉积物组成特征进行了研究。结果表明：(1) 大同土林沉积物的粒度组成以粉沙为主，平均含量高达50.6%，其次为黏土，平均含量为36.01%，粗颗粒组分的含量较低。(2) 自然频率分布曲线呈单峰和双峰分布模式，相应的累积频率曲线也呈单一直线型和两段型分布模式，表明土林沉积物组成以悬移组分占主导。(3) 随着土层深度的增加，土林沉积物平均粒径呈波动变粗的趋势，分选性由较差向差波动变化，偏度由负偏经近对称向正偏转变，峰态多为宽和中等。大同土林沉积物主要形成于河流相和湖泊相沉积的环境，并夹有风成地层，且这些地层在垂直剖面上呈互层分布。土林的形成受内、外营力的共同影响，其发育演化过程与当地气候变化密切相关。

关键词：土林；粒度；沉积环境；大同盆地

土林是指在干旱-半干旱地区，有半松散-半固结的碎屑沉积物经过流水剥蚀、堆积形成的林柱状、墙状及沟谷等一系列地貌的统称[1]。土林地貌在全球分布广泛，例如美国的布莱斯峡谷、土耳其的卡帕多西亚、哥伦比亚的La Playa Badlands、玻利维亚的月亮谷以及中国的许多地区等均有分布[1-3]。中国的土林主要分布于西藏阿里的札达盆地、青海龙羊峡、四川的西昌和旦都、甘肃天水和云南省楚雄的元谋盆地、大理南涧、普洱景东、临沧永德以及山西的大同盆地等地区[4-9]。不同区域土林地貌的组成物质不同。位于西藏扎达盆地[4]和云南元谋盆地[6,10]、大理南涧[7]等地的土林地貌主要由河湖相沉积物组成；西昌黄联土林主要为冰水冻融泥石流堆积物[5]；四川旦都土林主要由半风化的构造破碎岩石构成[9]。而华北地区唯一的土林地貌景观——大同土林，其下部主体为河湖相沉积物，仅在顶部覆盖有近50 cm厚的黄土[8]。对土林地貌的研究主要集中于对其形态特征、发育演化模式及其影响因素、区域气候变化、旅游资源评价与保护等方面进行了相关研究[11-12]，但是对其沉积物组成特征的研究却未见报道。

沉积物粒度组成特征是研究沉积环境的重要指标，最早主要应用于土壤分类，近年来已被广泛应用于风成、湖泊、河流、海洋及冰碛物等沉积环境的对比和鉴别。风成沉积物粒度特征可反映区域气候的干湿变化、风力强弱变化、沉积环境等信息[13-16]。湖泊沉积物粒度特征可以指示沉积时的降水、水动力强弱以及湖泊水位高低变化等信息[17-19]。河流沉积物粒度特征可以判断物质的运输方向、河道的变化过程及水深的变化情况等方面的特征[20-22]。此外，海洋沉积物粒度特征可以判断沉积物的运动方向[23]，冰碛物粒度参数对冰川环境具有一定的指示意义[24]。

大同土林位于黄土高原东北部，前期对其自然地理环境、地层、影响因素、旅游资源评价、开发与保护等方面进行了一定的研究[8,11-12]，但是对其沉积物粒度及其沉积环境的研究却十分薄弱。因此，本文通过对大同土林地貌沉积物粒度组成特征进行分析，结合大同盆地演化过程和古气候特征，以明确大同土林沉积物的发育环境。

收稿日期：2020-10-19； **修订日期：**2020-11-30
基金项目：山西省高等学校科技创新项目(2019L0797)
作者简介：蔡莹莹(1994-)，女，硕士研究生，主要从事风沙地貌研究. E-mail: 10070330565@qq.com
通讯作者：李继彦. E-mail: jyli@tynu.edu.cn

1　研究区概况与数据来源

1.1　研究区概况

大同土林位于大同市云州区杜庄乡杜庄水库旁的石板沟内(113°38′E,39°56′N),地处桑干河北侧大同盆地的边缘,且两侧被御河和坊城河所包围(图1),南北长约3 km,东西宽约1 km。区域属于温带大陆性季风气候,年均气温4.6~6.8 °C;年均降水量380~460 mm,多集中于7—9月,春季和冬季降水量仅占全年降水量的15%左右,年均蒸发量1700~2300 mm;年平均风速2.4~4.2 $m\cdot s^{-1}$,多北风和西北风,年均8级以上的大风日数在20~40 d[25]。大同土林区域内主要由数百个高约3~12 m的土柱、土壁组成。而土林的侧壁由于受到长期的风化作用、风力吹蚀和坡面流水的侵蚀,广泛发育深度约10~30 cm的纹沟(图2)[8]。且土体内的可溶盐在土林侧壁渗出,使土体表层的白色盐碱较多。大同土林主要由第四系泥河湾组地层组成,形成时间约为2.5~0.1 Ma BP。土林的上、下部呈红棕、黄棕色,中部为灰绿色夹鲜黄色条带,呈水平分布。土林顶部平坦,年代较泥河湾组更年轻,且有植被生长。

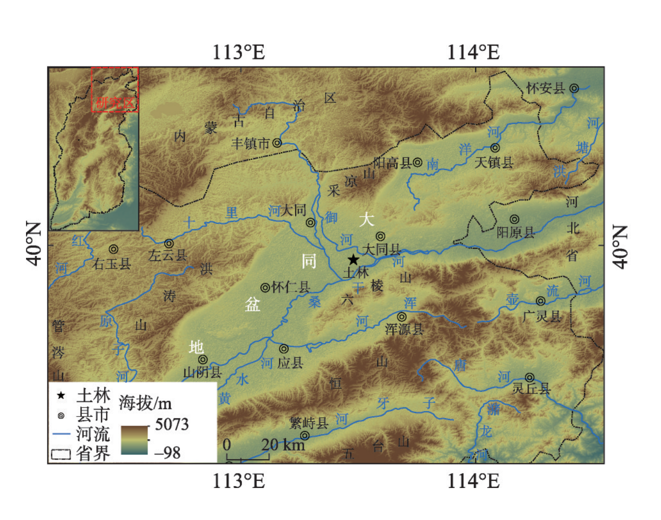


图1　大同盆地及土林地理位置

Fig. 1　Geographical location of Datong Basin and earth forest

1.2　数据来源

在研究区大同土林景区外围(113°28′44.11″E,39°56′26.78″N,海拔993 m)选取一剖面,高206 cm,未见底。对剖面表层的松散物质进行清理,出露新鲜土层后,对剖面进行观察(表1)。整个剖面呈黏土、粉质黏土与粉质亚黏土互层,自上而下以10 cm等间距采集,并在土层颜色和质地发生明显变化的155 cm和206 cm处也进行了样品采集,共采取样品23份,每件样品重约500 g。基于样品采集层位的不同,将样品依次编号为TL-0~TL-206。土林沉积物粒度实验在中国科学院西北生态环境资源研究院完成。粒度实验样品采用标准处理,采用英国马尔文公司生产的Mastersizer 3000激光粒度仪进行测试。颗粒按粒径大小可以分为黏土(＜5 μm)、粉沙(5~63 μm)、极细沙(63~125 μm)、细沙(125~250 μm)、中沙(250~500 μm)、粗沙(500~1000 μm)、极粗沙(1000~2000 μm)和砾石(>2000 μm)8个等级。

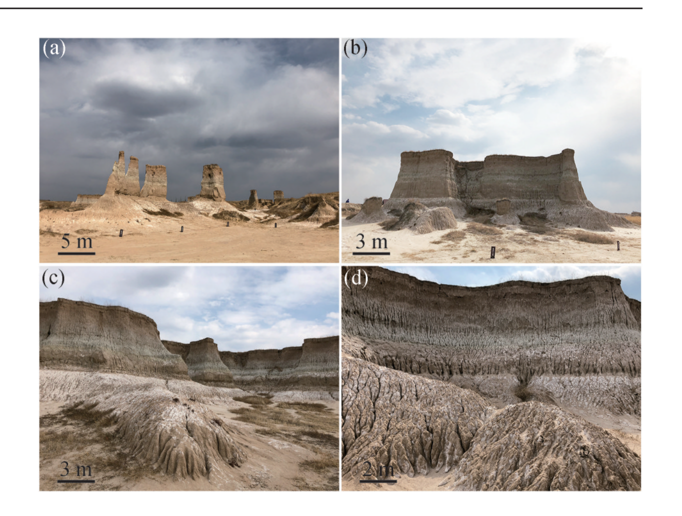


图2　大同土林形态特征

Fig. 2　Morphological characteristics of Datong earth forest

1.3　研究方法

采用Folk-Ward图解法计算粒度参数[26],包括平均粒径(M_z)、分选系数(σ_1)、偏度(SK_1)和峰态(K_g)。粒度参数分级详见表2[26]。粒度参数计算公式如下式:

$$M_z = \frac{\varphi_{16} + \varphi_{50} + \varphi_{84}}{3} \tag{1}$$

$$\sigma_1 = \frac{\varphi_{84} - \varphi_{16}}{4} + \frac{\varphi_{95} - \varphi_5}{6.6} \tag{2}$$

$$SK_1 = \frac{\varphi_{16} + \varphi_{84} - 2\varphi_{50}}{2(\varphi_{84} - \varphi_{16})} + \frac{\varphi_5 + \varphi_{95} - 2\varphi_{50}}{2(\varphi_{95} - \varphi_5)} \tag{3}$$

$$K_g = \frac{\varphi_{95} - \varphi_5}{2.44(\varphi_{75} - \varphi_{25})} \tag{4}$$

式中:φ_5、φ_{16}、φ_{25}、φ_{50}、φ_{75}、φ_{84}、φ_{95}分别表示概率累计曲线上5%、16%、25%、50%、75%、84%、95%处所对应的φ值。

表1 大同土林沉积地层剖面特征

Tab. 1 Characteristics of stratigraphic section of earth forest in Datong Basin

土层/cm	颜色	岩性特征
0~20	红黄色(7.5YR8/6)	黏土,质地疏松,发育弱的垂直节理
20~30	红黄色(7.5YR7/6)	粉质黏土
30~60	红黄色(7.5YR7/8)	粉质亚黏土,土质松散,水平层理
60~110	红棕色(2.5YR5/3)	粉质黏土,质地坚硬
110~130	淡褐色(10YR8/3)	黏土
130~140	淡褐色(10YR8/4)	粉质黏土
140~150	红棕色(2.5YR5/3)	粉质亚黏土,质地坚硬
150~155	淡褐色(10YR8/3)	黏土
155~170	红棕色(2.5YR5/3)	粉质亚黏土,质地坚硬
170~180	淡褐色(10YR8/3)	粉质黏土,具水平层理
180~206	红棕色(2.5YR5/3)	粉质亚黏土,质地坚硬

表2 Folk-Ward粒度参数分级表(φ值)

Tab. 2 Classification table of grain-size parameters (φ value)

分选系数σ_1		偏度SK_1		峰态K_g	
等级	范围值	等级	范围值	等级	范围值
极好	<0.35	极负偏	-1~-0.3	很宽	<0.67
好	0.35~0.5	负偏	-0.3~-0.1	宽	0.67~0.90
较好	0.5~0.71	近对称	-0.1~0.1	中等	0.90~1.11
中等	0.71~1.00	正偏	0.1~0.3	窄	1.11~1.56
较差	1.00~2.00	极正偏	0.3~1	很窄	1.56~3.00
差	2.00~4.00				
极差	>4.00				

2 结果与分析

2.1 粒级级配

根据大同土林地貌沉积物粒级级配可知(表3),土林沉积物粒级级配以粉沙为主,平均含量高达50.06%,变化范围在10.09%~74.33%;其次为黏土,平均含量为36.01%,在16.14%~88.45%之间变化;而极细沙平均含量为8.18%,在0.75%~15.68%之间变化;细沙和中沙的平均含量均低于5%;粗沙、极粗沙和砾石组分仅在剖面的个别土层中出现。由此可知,土林沉积物以细颗粒物质为主。

在整个剖面上,各粒级组分的含量变化差别较大。由于植被的生长,黏土粒级在土林表层含量最高,且随深度增加而呈波动减小的趋势。由于当地风力作用强盛,其表层沉积物受风沙活动的影响较大。粉沙粒级含量在表层最低,随着深度的增加在不同深度均出现了多级粉沙粒级含量增加的过程。这表明多期的水动力强弱的变化。10~70 cm粉沙含量整体上逐渐增加,沉积物颗粒较粗,表明水动力条件较强;而70~206 cm粉沙含量变化波动较大,表明水动力条件变化较大。极细沙、细沙和中沙随深度也表现出与粉沙类似的变化规律。整个剖面的粗沙、极粗沙和砾石的含量极低,表明土林区域的水动力偏弱或位于湖心区域(表3)。

粒度分布三角图常用于不同沉积物的粒度成分命名和比较[27]。由图3可知,大同土林地貌沉积物有6个样品为黏土,8个样品为粉质黏土,9个样品为粉质亚黏土。且黏粒组和粉沙组的含量均大于50%,而沙粒组的含量均小于50%。因此大同土林地貌沉积物主要由黏土、粉质黏土和粉质亚黏土3种物质组成。大同土林地貌沉积物三角图投点相对分散,多为细粒沉积物,表示分选差,水动力条件变化较大。

表3　土林剖面粒级级配和粒度参数

Tab. 3　Grain-size fractions and parameters of earth forest section

土层/cm	粒级级配/%								粒度参数			
	黏土	粉沙	极细沙	细沙	中沙	粗沙	极粗沙	砾石	M_z/φ	σ_1	SK_1	K_g
TL-0	88.45	10.09	0.75	0.55	0.16	0	0	0	9.08	1.25	0.07	0.98
TL-10	43.18	37.94	9.23	8.36	1.30	0	0	0	6.73	2.66	-0.22	0.96
TL-20	56.46	32.61	5.27	4.00	1.61	0.04	0	0	7.75	2.48	-0.21	1.08
TL-30	39.23	42.63	7.90	6.13	1.84	0.79	0.95	0.52	6.62	2.62	-0.20	1.03
TL-40	29.28	48.99	11.38	8.09	2.25	0.01	0	0	6.18	2.48	-0.07	0.89
TL-50	28.89	53.36	7.94	7.54	2.26	0	0	0	6.29	2.40	-0.09	1.08
TL-60	24.83	54.56	10.86	8.28	1.48	0	0	0	6.03	2.32	-0.05	0.95
TL-70	31.31	62.26	4.36	2.04	0.03	0	0	0	6.80	1.81	0.02	1.04
TL-80	41.89	54.99	2.04	0.71	0.29	0.09	0	0	7.31	1.67	0.01	1.00
TL-90	37.16	45.59	9.61	7.12	0.53	0	0	0	6.57	2.41	-0.17	0.95
TL-100	38.30	60.04	1.32	0.33	0	0	0	0	7.23	1.58	0.10	0.98
TL-110	33.79	62.85	2.64	0.72	0	0	0	0	6.99	1.64	0.04	1.01
TL-120	37.86	36.23	13.57	10.85	1.49	0	0	0	6.37	2.63	-0.19	0.71
TL-130	36.39	35.01	13.98	12.50	2.13	0	0	0	6.25	2.70	-0.14	0.70
TL-140	32.52	53.46	10.29	3.73	0	0	0	0	6.52	2.21	-0.04	0.92
TL-150	22.84	62.28	11.32	3.56	0	0	0	0	6.08	2.02	0.11	0.93
TL-155	54.27	37.99	5.53	1.43	0.57	0.21	0	0	7.54	2.24	-0.21	0.95
TL-160	22.18	74.33	2.75	0.74	0	0	0	0	6.54	1.55	0.18	1.10
TL-170	28.05	60.09	9.37	2.49	0	0	0	0	6.38	2.12	0.16	0.92
TL-180	38.23	46.15	10.44	4.99	0.19	0	0	0	6.67	2.42	-0.05	0.84
TL-190	20.52	53.78	15.68	9.53	0.49	0	0	0	5.68	2.24	0.11	0.87
TL-200	16.14	63.53	13.58	6.59	0.16	0	0	0	5.61	1.97	0.15	1.03
TL-206	26.43	62.51	8.29	2.78	0	0	0	0	6.40	1.99	0.07	0.99

注：M_z表示平均粒径；σ_1表示分选系数；SK_1表示偏度；K_g表示峰度。

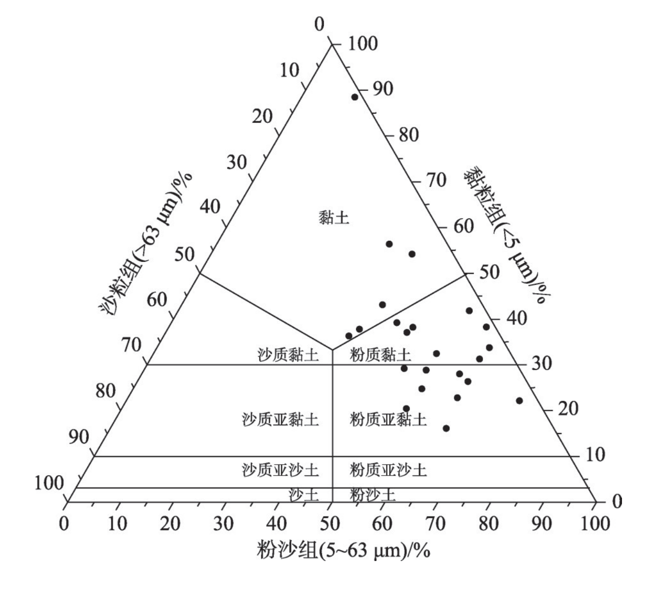


图3　大同土林地貌沉积物粒度组成三角图

Fig. 3　Triangle diagram of grain-size distribution for Datong earth forest sediments

2.2　频率分布曲线

沉积物粒度频率分布曲线可识别颗粒的运移模式，蕴含丰富的沉积环境信息[28]。由图4可知，在土林剖面表层、70 cm、80 cm、100 cm、110 cm、150 cm、160 cm、170 cm、200 cm、206 cm等层位的沉积物的粒度频率分布曲线呈单峰分布模式，曲线整体较宽平，峰值介于4~10 μm。其余土层的粒度频率曲线多呈双峰分布模式，0~70 cm、90 cm、140 cm、180 cm土层沉积物频率分布曲线主峰分布于10 μm左右，次峰介于100~200 μm。而在120 cm、130 cm、190 cm土层上，并不能明确的区分出主峰和次峰，二者的含量接近。

频率曲线呈单峰分布模式且为正态分布时，表明物质来源单一。当物源较复杂时，频率曲线呈正偏或负偏。由图4可知，在70 cm、80 cm、110 cm深度土层沉积物频率曲线呈单峰正态分布，且峰值高

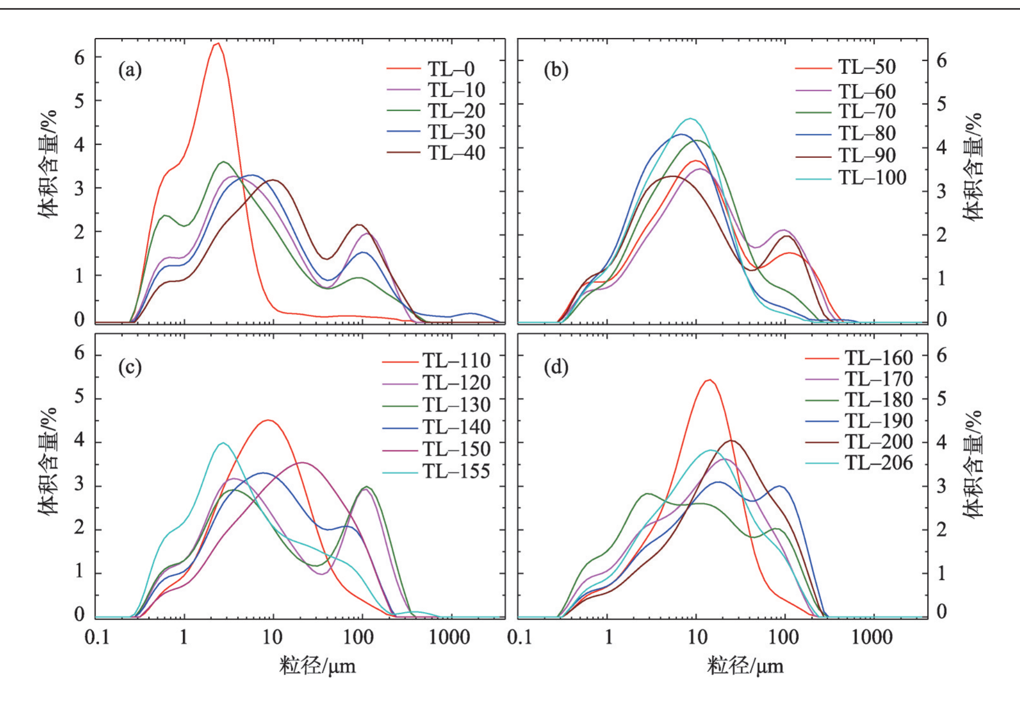


图4 大同土林地貌沉积物粒度频率曲线

Fig. 4 Grain-size frequency curves of Datong earth forest landform sediments

度集中于粉沙粒级，黏土和沙的含量较低，表明受单一的流水作用沉积。而其余土层频率分布曲线呈正偏或负偏，表明物质来源较复杂。

大同土林沉积物的粒度累积频率分布曲线呈单一直线型和两段型分布模式(图5)。单一直线型以悬移组分占绝对优势，沉积物粒度较细，斜率大于60°，主要分布在140 cm、150 cm和180 cm的土层中，悬移和跃移组分并未出现明显截点。其余土层为两段型分布模式，截点多位于10~30 μm，表明存在悬移和跃移两种组分，且前者的含量远高于后者，推移组分含量极低。例如，土林表层沉积物小于10 μm的悬移组分含量超过95%，而跃移组分不

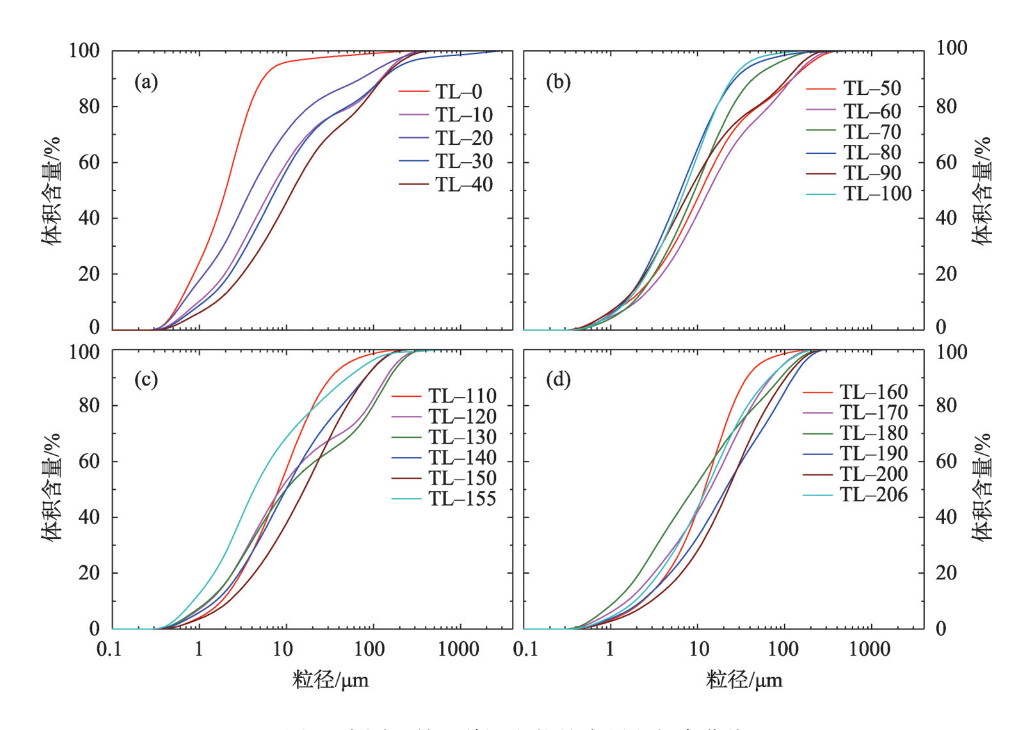


图5 大同土林地貌沉积物粒度累积频率曲线

Fig. 5 Cumulative grain-size frequency distribution curves of Datong earth forest landform sediments

足5%，表明沉积物粒度较细，反映了水动力条件较弱的沉积环境。而对130 cm层位的沉积物，其悬移组分含量近60%，跃移组分含量高达40%，反映了水动力较强的沉积环境。

2.3 粒度参数

大同土林地貌剖面沉积物在垂直方向上呈现出黏土与粉质黏土、粉质亚黏土互层分布的现象（图6）。平均粒径（M_z）介于5.61~9.08 φ，平均为6.68 φ，自底部至表层呈现波动变细的趋势。分选系数（σ_I）在1.25~2.70之间变化，平均为2.15，说明土林沉积物的分选为较差和差等级，且分选性在垂直方向上表现出多期由差向较差的波动变化。偏度（SK_I）介于-0.22~0.18之间，平均为-0.03，在剖面上表现出多期由正偏经过近对称向负偏的变化趋势。峰态（K_g）在0.70~1.10之间变化，平均值为0.95，说明土林沉积物的粒度分布曲线的峰态多为宽和中等。粒度参数在垂直方向的规律性变化，反映出搬运土林沉积物的外营力也发生了周期性的变化。

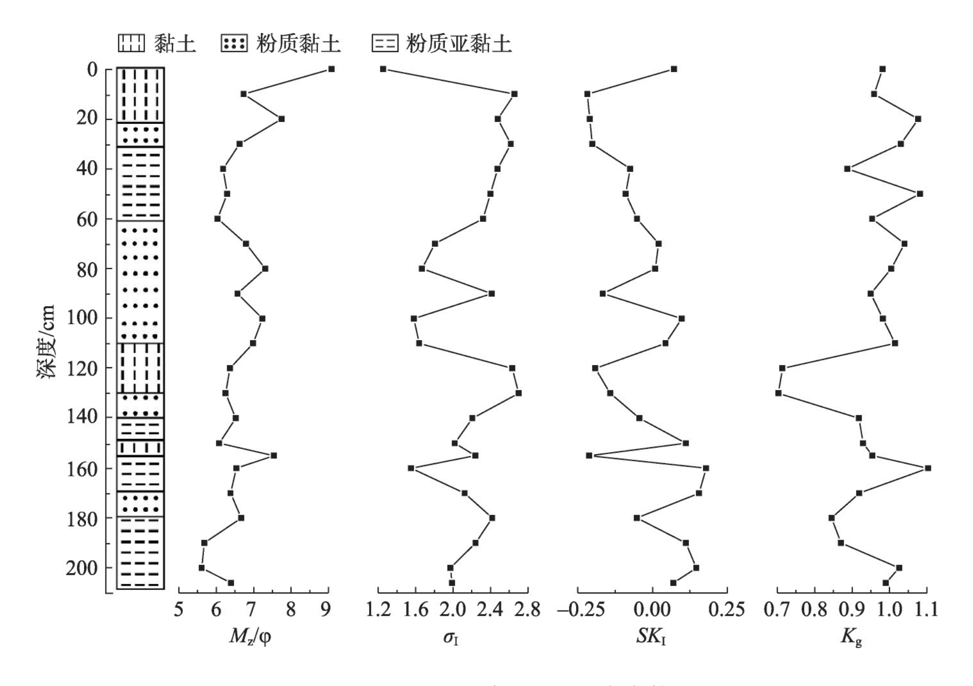


图6　大同土林地貌沉积物粒度参数

Fig. 6　Grain-size parameters of Datong earth forest landform sediments

3 讨论

物质组成特征对地貌的发育演化具有决定性的影响。由上述分析可知，大同土林地貌的粒级级配以粉沙和黏土为主，粗颗粒物质的含量甚少。从物质成分上看，大同土林主要由黏土、粉质黏土和粉质亚黏土3种物质组成，且三者在剖面上呈互层分布（图3）。这种物质组成特征与我国西北地区的雅丹地貌具有一定的相似性。柴达木盆地西北部的长垄状雅丹在物质组成上呈沙质亚砂土与粉质黏土或沙质亚黏土与粉质亚黏土的互层[29]，而新疆楼兰地区的雅丹则为黏土粉沙与沙质粉沙的互层[30]。由于土层组成物质不同，导致其抵抗外营力侵蚀的能力差别较大。虽然塑造土林的主导外营力为流水作用，而雅丹地貌为风力作用，但是流水作用在雅丹地貌发育的初期则起到了关键作用。而这种软硬岩层的互层分布，则为外营力的侵蚀奠定了基础。

沉积物粒度特征是恢复古气候环境的代用指标，因此，根据沉积物的粒度特征可以推断其形成的沉积环境[31]。大同土林沉积物粉沙含量占50.06%，平均粒径在5.61~9.08 φ，沉积物自底部至顶部呈现波动变细趋势。因此底部的粒度相对较粗，水动力条件较强，表明相对湿润的气候环境；表层沉积物粒度较细，水动力条件较弱，表明相对干旱的气候环境。河湖相沉积物的分选性较差，除了受沉积环境的水动力条件影响外，还与物源密切相关。多物源供应和不同动力相互影响都会使沉积物的分选性变差。大同土林沉积物的分选系数在

1.25~2.70之间变化，沉积物分选由较差向差转变，指示土林沉积物来源的多样性。偏度也受到沉积物物源的影响。一般来说，河流相和风成沉积物多呈正偏态，海滩沉积物多呈近对称和负偏态。大同土林沉积物的偏度总体上自底部至表层由正偏经近对称向负偏变化，表层呈正偏态。根据大同盆地的形成演化历史及土林剖面的粒度参数，可以判断土林中下部的地层为河湖相沉积物，而上部则为风成沉积物。

大同土林地貌的形成是地貌内、外营力共同作用的结果。受喜马拉雅运动的影响，大同盆地形成了地堑式的断陷盆地，盆地内逐渐积水形成湖泊，地质学上称为第四纪泥河湾期古湖泊，发育堆积了厚层泥河湾期古湖相地层。至更新世晚期，地壳运动活跃，造成区域性大面积抬升，南部的桑干河下切，泥河湾期古湖消失，并逐渐发育形成目前起伏不平的冲积平原[32-33]。其后，在区域河流周期性的摆动作用下，在原泥河湾湖相地层之上又先后堆积了河流相地层和黄土沉积物。因此，大同土林的地层组成在垂直方向上自下而上呈现湖相、河流相和风成地层的互层分布。

这也标志着大同盆地的古气候发生过周期性的暖湿与干冷的变化[11]。早更新世时期，气候温暖湿润，古湖发育，湖泊扩张。中更新世时期，气候温凉湿润，湖泊扩张，但幅度较小。中更新世末期至晚更新世，气候变干，地壳抬升，湖水外泄直至消亡。全新世时期，该地区气候总体处于干旱-半干旱状态[11]。因此，大同土林地貌中的河湖相地层，主要是在相对暖湿的气候环境条件下，由流水搬运的物质堆积形成的。而土林地貌中的风成地层，主要在干冷的气候条件下，由于河流的水量减少，导致原泥河湾古湖消失，湖盆裸露，由风力搬运、堆积形成的。后期，随着东亚季风的强盛，气候持续干冷，这些土层在地表流水、风力、重力等外营力的作用下发育形成土林地貌。

4 结 论

本文通过对大同土林地貌沉积物的粒度特征进行研究，结合大同盆地的发育演化和古气候特征，探讨了沉积物的物质组成和沉积环境演变。得出结论如下：

（1）大同土林地貌沉积物的粒度组成以粉沙为主，平均含量高达50.6%，其次为黏土，平均含量为36.01%，粗颗粒组分含量较少。

（2）沉积物粒度自然频率曲线呈单峰和双峰分布模式，曲线整体宽平；粒度累积频率曲线呈单一直线型和两段型两种分布模式，且各组分含量差别较大。

（3）沉积物平均粒径介于5.61~9.08 φ，分选系数在1.25~2.70，偏度介于-0.22~0.18，峰态在0.70~1.10。且随着土层深度的增加，平均粒径呈现波动变粗的趋势，分选性由较差向差波动变化，偏度由负偏经近对称向正偏转变，峰态多为宽和中等。

（4）大同土林沉积物主要形成于湖泊、河流和风成沉积环境，且3种沉积环境中的地层呈互层分布。土林地貌的发育演化与大同盆地的气候演变密切相关。

参考文献(References):

[1] 罗鹏辉, 张世涛, 田宜敏, 等. 土林地貌分类研究[J]. 地球学报, 2020, 41(4): 575-582. [Luo Penghui, Zhang Shitao, Tian Yimin, et al. The geomorphologic classification of earth forest landform[J]. Acta Geographica Sinica, 2020, 41(4): 575-582.]

[2] May F E, Traverse A. Palynology of the Dakota sandstone (middle cretaceous) near Bryce canyon national park, Southern Utah[J]. Geoscience and Man, 1973, 7(1): 57-64.

[3] Hermelin M. La playa badlands and their earth pillars[C]//Hermelin M. Landscapes and Landforms of Colombia. Springer International Publishing, 2016.

[4] 孟宪刚, 朱大岗, 邵兆刚, 等. 一种新的地质地貌景观类型——西藏札达盆地古格地貌的特征与成因初探[J]. 地质通报, 2006, 25(1-2): 295-301. [Meng Xiangang, Zhu Dagang, Shao Zhaogang, et al. A new type of geological-geomorphological landscape: Discussion of the Guge forest geomorphological features and its origin in the Zanda basin[J]. Geologcial Bulletin of China, 2006, 25 (1-2): 295-301.]

[5] 王小群, 魏玉峰. 西昌黄联土林的成因初探[J]. 水土保持研究, 2007, 14(1): 218-220. [Wang Xiaoqun, Wei Yufeng. The preliminary analysis on formation mechanism of the earth forest of Xichang-Huanglian[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2007, 14(1): 218-220.]

[6] 钱方, 凌小惠. 元谋土林成因及类型的初步研究[J]. 中国科学(化学), 1989, 19(4): 412-418. [Qian Fang, Ling Xiaohui. A preliminary study on the genesis and types of Yuanmou earth forest [J]. Scientia Sinica(Chimica), 1989, 19(4): 412-418.]

[7] 宁英铸. 南涧“土林”初探[J]. 云南地理环境研究, 1997, 9(2):

79- 83. [Ning Yingzhu. A preliminary study on “soil forest” of Nanjian[J]. Yunnan Geographic Environment Research, 1997, 9 (2): 79−83.]
[8] 赵艺学. 大同土林景区主要自然景物-土林形成过程及安全保护[J]. 干旱区资源与环境, 2012, 26(7): 195−200. [Zhao Yixue. Analysis on the development course of the earth-forest in Datong and its protection[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2012, 26(7): 195−200.]
[9] 彭东, 范晓, 王兆成, 等. 鲜水河断裂带炉霍旦都土林构造初步研究[J]. 四川地质学报, 2012, 32(1): 6−9. [Peng Dong, Fan Xiao, Wang Zhaocheng, et al. Preliminary study of the earth pillars in Dandu, Luhuo, Xianshuihe fracture zone[J]. Acta Geologica Sichuan, 2012, 32(1): 6−9.]
[10] 陈述云, 张建云. 元谋土林的形成条件及发育速率[J]. 云南地质, 1994, 13(4): 383−391. [Chen Shuyun, Zhang Jianyun. Formation conditions and developmentrate of earth forest of Yuanmou[J]. Yunnan Geology, 1994, 13(4): 383−391.]
[11] 张慧. 大同土林风景区晚更新世以来气候变化初步研究[D]. 太原: 山西大学, 2014. [Zhang Hui. Preliminary Study on Climate Change Since the Late Pleistocene of the Earth- Forest Scenic in Datong[J]. Taiyuan: Shanxi University, 2014.]
[12] 周玲, 刘敏, 柳文龙, 等. 土林旅游游客满意度评价及提升策略研究[J]. 太原师范学院学报(自然科学版), 2019, 18(1): 70−75. [Zhou Ling, Liu Min, Liu Wenlong, et al. The tourist satisfaction evaluation and promotion strategy of earth-forest tourism in Datong [J]. Journal of Taiyuan Normal University (Natural Science Edition), 2019, 18(1): 70−75.]
[13] 常宏, 左合君, 王海兵, 等. 黄河乌兰布和沙漠段两岸地表沉积物多重分形特征及其指示意义[J]. 干旱区研究, 2019, 36(6): 1559−1567. [Chang Hong, Zuo Hejun, Wang Haibing, et al. Multifractal features and their significances of surface sediments along both banks of the Yellow River reach in the Ulanbuh Desert[J]. Arid Zone Research, 2019, 36(6): 1559−1567.]
[14] 张惜伟, 汪季, 高永, 等. 呼伦贝尔沙质草原风蚀坑表层土壤粒度特征[J]. 干旱区研究, 2017, 34(2): 293−299. [Zhang Xiwei, Wang Ji, Gao Yong, et al. Grain size characteristics of topsoil in blowouts on sandy grasslands in Hulun Buir[J]. Arid Zone Research, 2017, 34(2): 293−299.]
[15] 毛丽, 苏志珠, 王国玲, 等. 毛乌素沙地不同土地利用类型的土壤粒度及有机质特征[J]. 干旱区研究, 2019, 36(3): 589−598. [Mao Li, Su Zhishu, Wang Guoling, et al. Soil particle size and organic matter content of different land use types in the Mu Us Sandland[J]. Arid Zone Research, 2019, 36(3): 589−598.]
[16] 鹿化煜, 安芷生. 黄土高原黄土粒度组成的古气候意义[J]. 中国科学(地球科学), 1998, 28(3): 278−283. [Lu Huayu, An Zhisheng. Paleoclimatic significance of loess grain size composition in the Loess Plateau[J]. Scientia Sinica(Terrae), 1998, 28(3): 278−283.]
[17] 隆浩, 王乃昂, 李育, 等. 毛乌素沙地北缘泊江海子剖面粒度特征及环境意义[J]. 中国沙漠, 2007, 27(2): 187−193. [Long Hao, Wang Nai’ang, Li Yu, et al. Particle size characteristics of deposits from PJHZ section in northern edge of Mu Us Desert and their environmental significance[J]. Journal of Desert Research, 2007, 27(2): 187−193.]
[18] 曹广超, 马海州, 隆浩, 等. 柴达木盆地东部尕海湖DG03孔岩芯粒度特征及环境意义[J]. 中国沙漠, 2008, 28(6): 1073−7077. [Cao Guangchao, Ma Haizhou, Long Hao, et al. Particle size characteristics of deposits from DG03 core of Gahai Lake in east of Qaidam Basin and their environmental significance[J]. Journal of Desert Research, 2008, 28(6): 1073−7077.]
[19] Peng Y, Xiao J, Nakamura T, et al. Holocene East Asian monsoonal precipitation pattern revealed by grain-size distribution of core sediments of Daihai Lake in Inner Mongolia of north-central China [J]. Earth and Planetary Science Letters, 2005, 233(3−4): 467−479.
[20] le Roux J P, O’Brien R D, Rios F, et al. Analysis of sediment transport paths using grain-size parameters[J]. Computer & Geosciences, 2002, 28(5): 717−721.
[21] Wang Z, Chen Z, Li M, et al. Variations in downstream grain-sizes to interpret sediment transport in the middle-lower Yangtze River, China: A pre-study of Three-Gorges Dam[J]. Geomorphology, 2009, 113(3−4): 217−229.
[22] Yi L, Yu H, Ortiz J D, et al. A reconstruction of late Pleistocene relative sea level in the south Bohai Sea, China, based on sediment grain-size analysis[J]. Sedimentary Geology, 2012, 281: 88−100.
[23] Stuut J-B W, Prins M A, Schneider R R, et al. A 300-kyr record of aridity and wind strength in southwestern Africa: Inferences from grain-size distributions of sediments on Walvis Ridge, SE Atlantic [J]. Marine Geology, 2002, 180(1−4): 221−233.
[24] 武安斌. 冰碛物的粒度参数特征及其与沉积环境的关系[J]. 冰川冻土, 1983, 5(2): 47− 53. [Wu Anbin. Relationships between the grain- size features of the moraines and depositional environments[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 1983, 5(2): 47−53.]
[25] 张莉秋, 张红, 李皎, 等. 晋北沙漠化地区1980—2014年的气候变化[J]. 中国沙漠, 2016, 36(4): 1116−1125. [Zhang Liqiu, Zhang Hong, Li Jiao, et al. Climate change in sandy desertification area of the northern Shanxi from 1980 to 2014[J]. Journal of Desert Research, 2016, 36(4): 1116−1125.]
[26] Folk, R L, Ward W C. Brazos river bar: A study in the significance of grain size parameters[J]. Journal of Sedimentary Research, 1957, 27(1): 3−26.
[27] 任明达, 王乃梁. 现代沉积环境概论[M]. 北京: 科学出版社, 1981. [Ren Mingda, Wang Nailiang. An Introduction to Modern Sedimentary Environment[M]. Beijing: Science Press, 1981.]
[28] Visher G S. Grain size distributions and depositional processes[J]. Journal of Sedimentary Research, 1969, 39(3): 1074−1106.
[29] 郜学敏, 董治宝, 段争虎, 等. 柴达木盆地西北部长垄状雅丹沉积物粒度特征[J]. 中国沙漠, 2019, 39(2): 79−85. [Gao Xuemin, Dong Zhibao, Duan Zhenghu, et al. Grain- size characteristics of long ridge yardangs in the northwestern Qaidam Basin[J]. Journal of Desert Research, 2019, 39(2): 79−85.]

[30] 林永崇, 穆桂金, 秦小光, 等. 新疆楼兰地区雅丹地貌差异性侵蚀特征[J]. 中国沙漠, 2017, 37(1): 33−39. [Lin Yongchong, Mu Guijin, Qin Xiaoguang, et al. Erosion characteristics of yardangs at Loulan area, Xinjiang[J]. Journal of Desert Research, 2017, 37(1): 33−39.]

[31] 王琳栋, 杨太保, 梁烨, 等. 会宁地区全新世黄土沉积粒度特征及其古气候意义[J]. 干旱区研究, 2016, 33(6): 1150−1156. [Wang Lindong, Yang Taibao, Liang Ye, et al. Grain size characteristics in the loess-paleosol at Huining section and its signification to paleoclimate during Holocene[J]. Arid Zone Research, 2016, 33(6): 1150−1156.]

[32] 吉云平, 王贵玲. 泥河湾盆地第四纪古湖最终消亡过程研究[J]. 地球学报, 2017, 38(增刊): 38−42. [Ji Yunping, Wang Guiling. Final disappearing process of ancient lake during Quaternary in Nihewan Basin[J]. Acta Geoscientica Sinica, 2017, 38(Suppl.): 38−42.]

[33] 闵隆瑞, 朱关祥. 从台儿沟剖面的地质特征看第四纪泥河湾古湖的演化[C]//中国地质学会沉积地质专业委员会. 第三届全国沉积学大会论文摘要汇编. 成都: 中国地质学会, 2004. [Min Longrui, Zhu Guanxiang. Evolution of the Quaternary Nihewan Ancient Lake from the Geological Characteristics of the Taiergou Section[C]//Sedimentary Geology Committee of Geological Society of China. Summary of Papers from the Third National Congress on Sedimentology. Chengdu: Geological Society of China, 2004.]

Grain size characteristics of earth forest sediments in the Datong Basin

CAI Yingying, LI Jiyan, QU Xin, WANG Meng, WANG Yingying

(School of Geography Science, Taiyuan Normal University, Jinzhong 030619, Shanxi, China)

Abstract: Earth forests are typical fluvial erosion landforms, which refer to a series of positive and negative relieves, such as column-shaped and wall-shaped forests, as well as gullies. The materials that composed the earth forests are previously deposited semi-loose to semi-consolidated fluvial and lacustrine strata. Therefore, the earth forests' strata bear abundant information on regional environmental change. By applying grain size analysis to the sediments of earth forests' strata, this study tentatively demonstrates the material composition and the regional sedimentary environment's variation processes. A study on grain size characteristics of earth forest landform sediments in the Datong Basin can make clear its material composition and sedimentary environment and provide a scientific basis for the development and evolutionary history of earth forest landforms. Here, 23 sediment samples were collected from a stratum profile of earth forest, and their grain size grading, frequency distribution curves, and grain size parameters were analyzed. The results indicated that the earth forest in the Datong Basin was mainly composed of silt, with an average content of 50.6%, followed by clay, with an average content of 36.01%, and the contents of coarser grain size fractions were scarce. The frequency distribution curve showed uni- and bi-modal distribution patterns. The cumulative grain size frequency curves showed one- and two-segment distribution patterns, which indicated suspension and saltation loads, and each component's content varied. With the increase in soil depth, the average particle size tends to fluctuate and become coarser. The sorting characteristics fluctuate from moderately poor to poor. The skewness changed from nearly symmetrical to negative and eventually positive. The kurtosis was mostly wide and medium. Sediments of the Datong earth forest were mainly formed in the aeolian, fluvial, and lacustrine sedimentary environments, and these strata were vertically interbedded. The formation of the earth forest is affected by internal and external forces, and its developmental and evolutionary process is closely related to the local climate change. The earth forests' strata are usually deposited in the fluvial and lacustrine environments during relatively warmer conditions, while they are deposited by aeolian deposition during the arid climate.

Keywords: earth forest; grain-size; sedimentary environment; Datong Basin